

베어링용 시일의 일반

최인혁* · 현준수* · 김청균**

*한국종합기계(주)

**홍익대학교 기계공학과

1. 서 론

기계 시스템에서 사용되고 있는 밀봉 장치는 에너지나 환경오염 등에 밀접한 관련을 맺고 있는 기계요소로 고속, 고압력, 진공, 고온 및 저온 등의 가혹한 조건에서 사용되고 있는 정밀기계가 많아지면서 그 중요성이 크게 증대되고 있다.

구름 베어링의 상대접촉 운동면에서 윤활과 시일에 관련된 설계조건은 대단히 중요하다. 베어링용 시일은 먼지, 분진, 수분, 모래입자와 같은 이물질이 베어링 내부로 침입하는 것을 차단하여 윤활제의 기능이 저하되는 것을 방지하여야 하고, 또한 베어링 내부의 윤활제가 외부로 유출되지 않고 베어링 내부에 균일하게 분포되어 회전 접촉부에서 윤활이 잘 이루어질 수 있도록 보조해주는 역할을 수행하는 중요한 요소이다.

베어링에 가장 적합한 형태의 시일을 선정하기 위하여 시일의 효율, 가격, 설치공간, 마찰력, 작동온도, 수명 등을 고려하여야 한다. 볼 타입 밀봉 베어링의 윤활제로는 그리이스가 가장 많이 사용되고 있고, 시일 재질로는 고무계통이 널리 사용되고 있다. 접촉식 고무시일은 베어링의 작동조건이 그다지 가혹하지 않는 상태에서 사용될 경우 시일으로써의 역할은 대단히 효과적이다.

볼 베어링에서 고무재질을 이용한 밀봉형태는 시일 립 선단부가 내륜의 측면을 축방향으로 접촉하고 있는 기계평면시일 형태의 접촉시일과 내륜의 안쪽을 접촉하는 오일시일 형태의 접촉시일이 있다.

베어링용 시일에 관련된 참고자료는 대단히 작았고, 川上善久[1]가 단순보 이론을 이용하여 립 선단이 회전부에 접촉하는 오일시일 형태를 이상화시킨 시일 립에 관한 초보적인 연구를 수행한 정도이다. 또한 밀봉용 그리이스 베어링의 수명은 구름 접촉운동에 관련된 피로, 윤활 및 시일기능에 의존하는 것으로 알려져 있는데, Benktander[2]와 Bras[3]의 연구결과에 의하면 베어링의 고장 원인중에서 시일의 손상으로 인한 고장이 가장 큰 것으로 보고되었다. 시일의 성능에 가장 큰 영향을 주고

있는 변수는 시일 립과 베어링 회전부 사이의 접촉면에 관련된 접촉면압, 즉 접촉면에서의 간섭량에 관한 것이 다.

2. 베어링용 시일의 개요

2-1. 시일의 기능 및 선정기준

베어링에 사용되고 있는 시일(Seal)은 베어링 내부의 윤활제가 외부로 누설되는 것을 방지하여 베어링의 윤활이 원활하게 이루어지도록 하고, 또한 베어링 외부에서 고체(먼지, 모래, 스케일, 분진 등), 액체(물, 해수, 오염된 윤활제 등), 기체(프레온가스, 습증기 등)와 같은 이물질이 침입하는 것을 방지함으로써 베어링의 윤활기능을 강화시키고 수명을 연장할 수 있으므로 널리 사용되고 있다.

구름 베어링의 전동체, 내륜과 외륜, 리테이너의 치수 정밀도와 조합 정밀도, 선정된 재질의 성질이나 부하 용량 등은 베어링의 성능에 중요한 영향을 주고 있다. 또한 베어링에 시일의 사용은 밀봉과 이물질 차단효과를 기대할 수 있고 베어링의 윤활성능을 향상시키게 됨으로 운전상태가 양호하게 되면서 수명이 연장되고, 소음이나 진동이 완화되므로 베어링의 성능향상에 크게 기여하게 된다.

베어링에서 밀봉성능이나 이물질 침입이 그다지 문제가 되지 않는 경우에 널리 사용되고 있는 비접촉식 베어링 시일은 구조적으로 협로를 만들어 시일의 기능을 대체하고 있다. 밀봉성능이 우수해야될 경우에 사용되고 있는 접촉식 시일은 립부와 레이스 사이의 접촉면압의 크기를 어떻게 설계하느냐에 따라서 밀봉성능과 마찰손실이 서로 상반되게 작용한다. 그래서 밀봉효과를 극대화시키면서 에너지 손실을 최소화시킬 수 있는 시일 립부의 최적화 설계가 베어링 성능에 미치는 영향이 대단히 크다.

베어링용 시일 시스템은 베어링 제작회사마다 밀봉기능을 충분히 발휘할 수 있는 여러가지 형태의 시일을

독자적으로 제작하고 있다. 베어링용 시일은 특별한 경우를 제외하고는 범용시일을 사용하고 있으며, 가능하면 경제적이고 밀봉성능이 우수하며 마찰손실이 대단히 작은 시일을 제작하려고 많은 연구를 하고 있다.

시일의 경쟁력을 갖기 위해서는 제작이 용이해야 하고, 설비의 자동화를 통한 대량 생산체제를 갖추어 생산성을 높여야 하며, 시일재질의 가격이 저렴한 것을 선정해야 한다. 시일의 밀봉성능을 향상시키기 위하여 시일 립부가 접촉하는 베어링부의 형상설계를 래버린스시일처럼 험로를 구성하고, 시일의 접촉면압에 큰 영향을 주고 있는

시일재질(고무)의 경도를 증가시키고, 보강테를 사용하여 변형 저항성을 향상시키며, 접촉부의 간섭량을 증가시켜 밀봉효과를 증가시킨다. 또한 접촉부의 마찰손실을 감소시키기 위하여 시일 립 형상의 최적화, 최소한의 간섭량 유지, 베어링 회전 정밀도의 향상, 윤활제 및 시일 재료의 선정에 많은 검토를 해야 한다.

베어링의 성능을 향상시키기 위하여 사용되고 있는 시일의 적절한 설계는 다음과 같은 사항을 고려하여 선정해야 한다.

- 윤활제의 종류
- 베어링 내부 윤활제의 보지 능력
- 외부 이물질 차단 정도
- 시일의 마찰 손실 정도
- 시일의 수명
- 제작공정 수준
- 작동조건(온도, 속도, 하중 등)

2-2. 밀봉부의 구성요소

베어링용 시일의 밀봉은 시일 립 선단부와 회전 접촉면(내륜) 사이에서 이루어지고, 보조적인 밀봉기능을 수행하는 요소로 방진시일 립, 플링거, 공기 유동흡 등이 있다. 그림 1(1)은 접촉식 평면시일(Face seal)의 형태를, 그림 1(2)는 접촉식 축 시일(Shaft seal)의 형태를 각각 나타낸다.

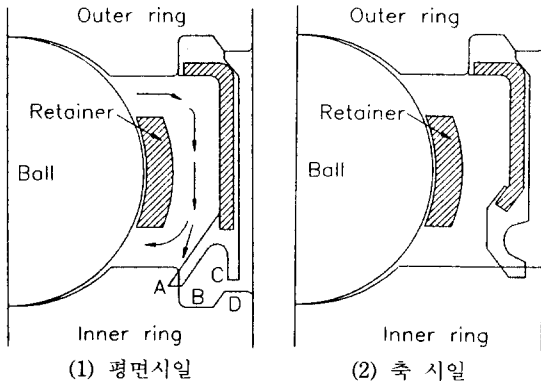


그림 1. 접촉식 밀봉형 볼 베어링 단면도

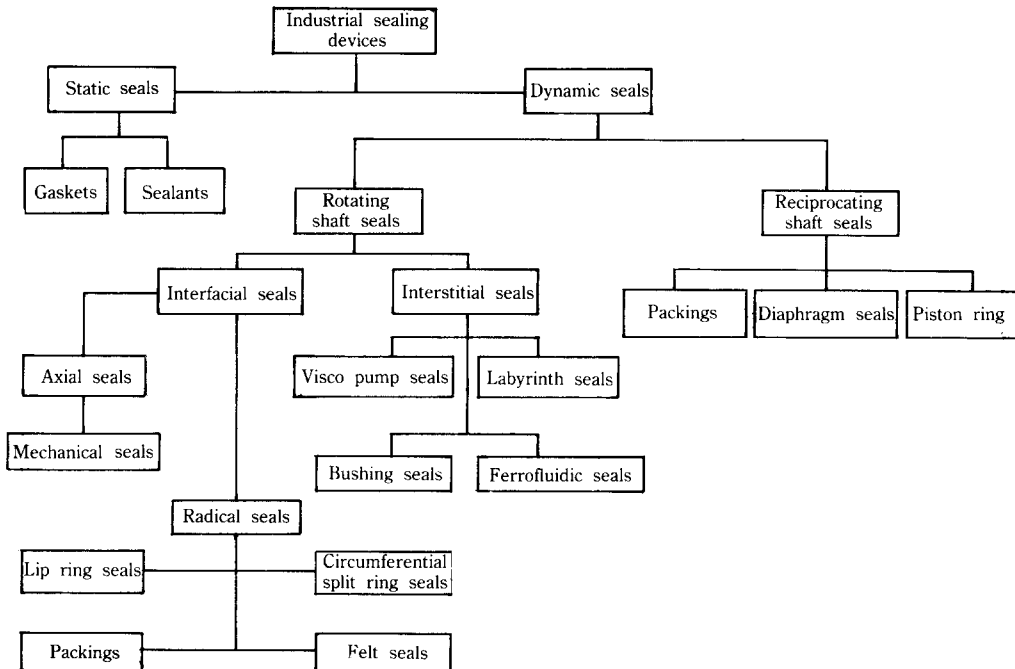


그림 2. 밀봉 장치의 분류도

2-2-1. 시일 립(Seal lip)

베어링 내부의 윤활제가 누설되거나 또는 외부의 이물질이 내부로 침입하는 것을 방지하는 부분으로 립 선단부는 회전 마찰부(내륜)와 직접 미끄럼 접촉을 하게 된다. 시일 립 선단부는 물리적 성질이 어떠한가에 따라서 베어링의 밀봉기능 및 수명에 직접적인 영향을 주고 있는 핵심 부분이다.

시일 립은 시일의 몸체 부분에 연결되어 상대 접촉 운동면과의 간극(간섭량)에 의하여 밀봉을 하게 된다. 베어링용 시일 립의 간섭량은 시일의 장착 형태와 적용부위에 따라서 약간 달라질 수는 있으나 일반적으로 설계시 0.3~1 mm의 간섭량을 주고 있다. 접촉식 평면 시일(Face seal) 형태를 보여주고 있는 그림 1(1)의 A 부분은 시일 립 선단부를 나타낸다.

2-2-2. 방진시일 립(Dust seal lip)

시일의 성능을 향상시키기 위하여 그림 1(1)의 C 부분과 같은 방진시일 립(보조 시일 립)을 설치한다. 방진 시일 립은 주로 평면시일에서 사용하는 형태로 그림 10의 (1), (2), (3)과 같은 형태가 있다. 주 시일 립은 회전 마찰부와 직접 접촉에 의하여 밀봉을 하고, 방진시일 립은 비접촉형으로 외부로부터 이물질(먼지, 모래, 습증기, 가스 등)의 침입을 일차적으로 차단하는 역할을 수행하여 주 시일 립 선단부를 보호하고 시일 내외부의 압력차를 조절하여 밀봉효과를 증대시키는 역할을 수행한다.

2-2-3. 공기 유동흡

베어링에 시일이 장착될 경우 베어링의 케도륜(보통은 내륜)에 시일이 흡착되는 문제가 발생하게 된다. 이 현상은 시일 립이 외부로 향해 있는 경우 내부압력이 작아지면서 문제가 발생된다.

시일의 흡착 현상은 베어링이 열응력을 반복적으로 받을 경우 정지되었던 기계가 갑자기 작동하거나, 또는 온도가 급강하되는 경우에 발생 빈도가 높아지는 것으로 알려졌다. 이러한 문제는 시일 내외부의 압력차를 일정하게 유지시킬 수 있는 여러가지 시일구조를 설계하여 해결하고 있다. 또한 베어링 내부의 압력이 증가하면서 시일이 흡착되는 형태의 시일도 있는데 이는 베어링 내의 온도가 높아져 베어링 내부에 존재하는 수분이나 증발된 윤활제의 압력 상승에 의하여 누설이 발생되고, 그로 인하여 베어링내의 압력이 갑자기 낮아지게 되면서 베어링 내에서는 누설된 양만큼의 질량이 필요하게 되므로 외부로부터 흡수를 하려고 하지만 외부로부터 물질이 유입되지 못하게 되면 시일이 대신 흡착되게 되는데 이와 같은 현상을 흡착현상이라고 한다. 이와 같은 경우를 위하여 공기 유동흡을 만들어 흡착문제를 해결하고 있다. 공기 유동흡이 없는 베어링을 작동시킬 경우 초기의 기동

토크가 높으나, 시일에 공기 유동흡을 설치하게 되면 기동 토크는 낮아지게 된다.

2-2-4. 플링거(Flingers)

내륜측에 시일 홈이 있는 평면시일에서 그림 1(1)의 D 부분과 같은 턱을 내륜의 외측에 만든 것을 플링거라 한다. 즉, 플링거는 방진시일 립 선단부분과 마주치는 비접촉 운동부분으로 방진시일 립의 이물질 차단기능을 도와주는 역할을 한다.

2-3. 시일의 분류

2-3-1. 산업용 시일의 분류

산업체에서 누설을 방지하거나, 또는 외부의 이물질 침입을 차단하기 위하여 사용되고 있는 시일장치는 그림 2와 같이 정적 시일 및 동적 시일로 분류할 수 있고[4], 베어링에 사용되고 있는 접촉형 시일은 립형 시일(Lip type seal) 계통에 속한다.

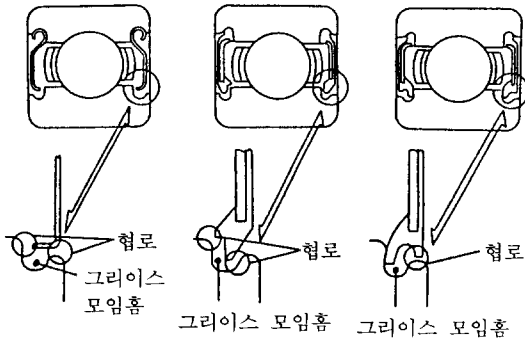
2-3-2. 베어링용 시일의 종류

(가) 볼 베어링용(Ball bearings)

볼 베어링에 사용되고 있는 시일은 그림 3에서 보여 주고 있는 것과 같이 실드형, 비접촉형과 접촉형의 고무시일이 있다. 비접촉형 고무시일은 실드형에 의하여 대체되기도 하지만, 접촉형의 경우 고무자체의 탄성을 바탕으로 한 유연성이 대단히 우수하기 때문에 여타 재료로는 대체가 거의 안되고 있다. 또한, 구름 베어링용 시일에서 접촉형은 접촉압력에 따라 경(輕)접촉형과 중(重)접촉형으로 나눌 수 있으나 그 사용개소의 선정은 사용조건에 의하여 결정된다. 외부 이물질의 침입이 그다지 문제가 되지 않고 중·고속 상태로 사용되는 곳에서는 경접촉형 시일이 사용되며, 외부의 주변환경 조건이 나쁜 곳에서는 중접촉형 시일을 일반적으로 사용한다. 접촉형 시일은 외부 이물질의 침입 우려가 큰 경우 적용이 되지만 이는 마찰 토크가 크고 고속회전에서는 베어링에 발열이 일어나는 단점이 있으므로 시일 선정에 주의할 기울일 필요가 있다. 구름 베어링에서 널리 사용되고 있는 시일을 접촉형태에 따라 분류하면 다음과 같다.

① 실드(Shield)

실드는 비접촉형 시일의 한 형태로 보통은 강판으로 제작되며 베어링 작동시 주변의 회전부와 접촉되지 않도록 설계하여야 하고, 베어링의 회전 정밀도와 실드 자체의 제작 및 조립 허용차를 모두 포함하는 간격을 유지하도록 설계되어야 한다. 또한 실드는 프레스 가공에 의하여 제작되고 있으므로 복잡한 형상으로 제작하기가 어려우며, 커다란 탄성 변형이 불가능하고 미로에 삼입될 수 없기 때문에 고무시일과 같은 밀봉성을 기대하기는 어렵다. 특별한 경우 실드 자체에 녹이 발생할 우려가



(1) 실드 시일 (2) 비접촉형 시일 (3) 접촉형 시일

그림 3. 구름 베어링용 시일의 접촉 형태

있으므로 주의를 요한다. 그러나 내부에서 발생하는 마찰열을 외부로 전달하기 쉬우며 내열성이 있으므로 오물이 많지 않은 고속용으로 적합하다. 일반적으로는 비접촉형 고무시일의 대응으로 사용되기도 한다.

그림 3의 (1)은 구름 베어링용 실드의 정착형태를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 비접촉형으로 2군데에 협로가 있고, 그리스 모임홈(Grease reservoir)을 제작하여 그리스 및 외부의 이물질 통로에 미로 형상을 만들어 밀봉 기능을 보완하고 있다. 현재 사용되고 있는 실드 형태는 일반적으로 연강판을 프레스 가공한 Z형식이 일반적이나, 특수한 경우 고무로 강판을 접합하는 RZ형식, 실드와 시일의 중간 형태 기능을 갖는 TZ형식이 있다. Z형식의 실드에 비하여 RZ형식은 먼지 차단 기능면에서 5배 정도, 그리스 보지 기능면에서는 약 2배 정도 우수하다.

② 비접촉형 고무시일

비접촉형 고무시일은 시일 립 부위가 상대면(베어링 내륜)과 접촉을 하고 있지 않은 형태로 시일의 외관은 접촉형 시일처럼 보강태(철판)에 고무를 덮어 씌운 형태를 하고 있으나 립 부위의 마찰에 의한 발열, 마멸 등은 무시할 수 있으므로 이런 시일형태의 성능 저하는 분위기 온도 및 베어링 온도에 의한 물성만의 변화 뿐이라고 할 수 있다. 따라서 열 노화에 의한 경도 증가, 탄성의 상실 등이 생긴다해도 시일 성능에 미치는 영향은 비교적 미미하기 때문에 비접촉형 시일의 사용온도 범위는 접촉형에 비해 상대적으로 넓다.

그림 3의 (2)에서 보여주고 있는 비접촉형 고무시일을 보면 시일 립 부분에 복잡한 형상의 협로와 그리스 모임홈이 제작되어 있다. 시일 립의 최초 내경치수는 베어링 내륜의 가장자리 외경치수보다 작기 때문에 조립시에는 시일 립이 탄성변형을 하여 장착될 수 있도록

하였으므로 실드형보다 협로의 길이가 길어 밀봉성이 우수하다고 할 수 있다. 또한 시일 립이 베어링 내륜에 접촉되지 않으므로 고속의 사용조건에서도 시일에 의한 마찰열이나 시일 립의 마멸 없이 원활하게 작동될 수 있다.

③ 접촉형 시일

접촉형 시일의 경우는 시일 립 선단부가 상대면과 접촉압력을 가지고 접촉하고 있으므로 마찰에 의한 마멸, 마찰열에 의한 소성변형, 경화 등의 문제가 시일의 성능에 영향을 미치게 된다. 그러므로 여러가지 형태의 시일중에서 가장 고도의 기술을 필요한 형태로 시일 설계시 고려되어야 할 사항이 대단히 많다. 마멸과 소성변형이 생기는 경우 립부위와 상대 접촉면간에는 접촉압력이 감소하여 결국에는 접촉압력이 영(Zero) 이하인 상태(간섭량이 없는 상태)에까지 이르게 된다. 그러나 이런 상태로 된다 해도 비접촉형 시일의 경우보다는 시일 립과 상대면의 간극(Clearance)이 훨씬 작은 상태로 유지되므로 실용상 크게 문제가 되지 않는 경우가 많다. 접촉압력이 극히 작고 먼지, 모래, 물과 같은 이물질이 많은 경우에는 주의를 기울일 필요가 있으며 이런 경우 베어링에 부착되는 시일은 보조 시일로 사용되는 방진 시일(Dust seal) 설계가 요망된다.

접촉형 시일에서 회전속도가 고속인 경우 초기의 발열에 의하여 과도한 그리이스의 누설, 열화, 시일 립부의 손상이 초래될 수도 있으므로 접촉형 시일을 고속에 적용할 경우에는 고도의 설계 및 제작기술을 요한다.

그림 3의 (3)에서 보는 바와 같이 접촉형 고무시일은 베어링 궤도쪽으로 립이 접촉하고 있으며, 그리스 모임홈 및 협로가 만들어져 있다. 여기서 베어링 내륜과 협로를 형성하는 시일 부분은 보조 시일 립이라고 할 수 있으며 베어링 내륜 부분은 플러거 역할을 겸하고 있다.

(나) 테이퍼 로울러 베어링용(Tapered roller bearings)

테이퍼 베어링에 사용되고 있는 시일의 형태는 접촉식의 축시일(Radial lip seal), 유체 립 시일(Hydrodynamic lip seal), 평면 시일(Face seal) 및 비접촉식의 래버린스 시일(Labyrinth seal)과 유체시일(Hydrodynamic seal)이 있다.

① 축시일(Radial lip seal)

테이퍼 베어링을 밀봉하기 위한 시일은 그림 4(A)와 같이 단일 립이나 복수 립을 이용하여 외부의 먼지를 차단하기 위한 먼지 차단용 축시일(Dirt excluding seals)이 있고, 베어링 내부의 그리이스를 밀봉하면서 외부의 이물질을 차단하기 위한 그리스 시일(Grease retaining seals)이 그림 4(B)에서 보여주고 있으며, 그림 4(C)와 같이 오일을 밀봉하는데 주로 사용되는 오일시일(Oil retaining seals)이 있고, 그림 4(D)와 (E)는 오일시일의

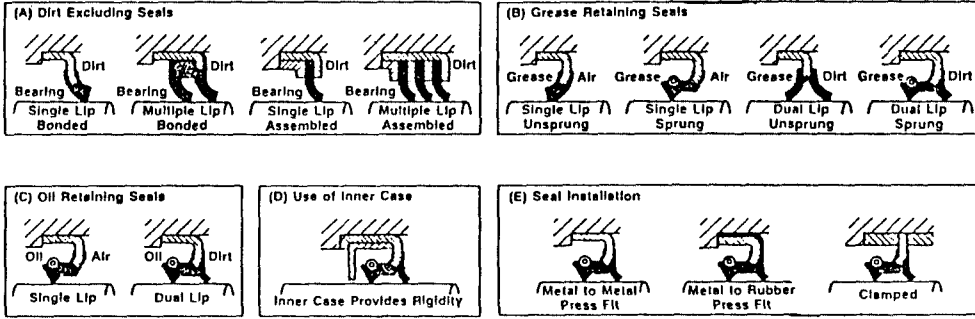


그림 4. 테이퍼 베어링용 축시일

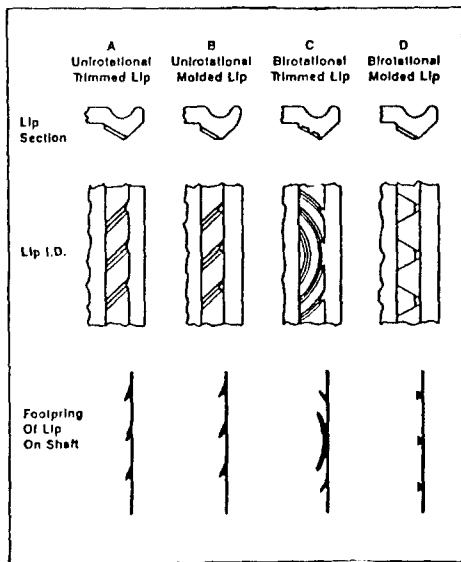


그림 5. 접촉식 유체 립 시일

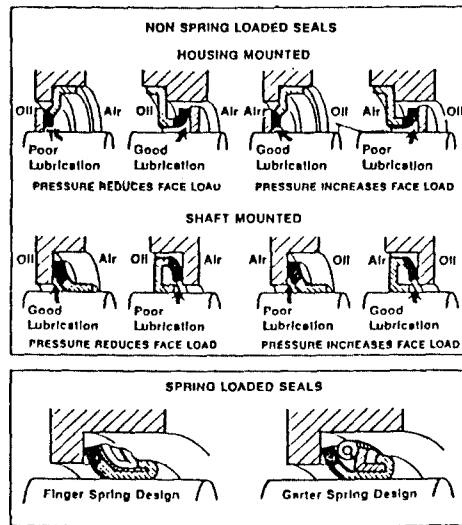


그림 6. 탄성체 평면시일

설치에 관련된 것이다.

② 유체 립 시일(Hydrodynamic lip seals)

베어링 내의 밀봉 유체가 누설되는 것을 가능한 완전하게 차단하기 위하여 널리 사용되고 있는 시일로 그림 5와 같이 립 선단부에 홈을 만들어 미리 설정된 방향으로 윤활제가 이동을 하도록 제작한 시일이다. 시일의 형태에 따라 한 방향 또는 양방향용 유체 립 시일이 있다. 시일의 구체적인 성능 평가는 SAE Handbook J1002를 참조하면 된다.

③ 평면 시일(Face seal)

베어링의 밀봉이 회전축에 수직인 평면에서 이루어지기 때문에 평면시일이라는 칭호가 붙여진 것으로 탄성체 평면시일(Elastomeric face seal)과 기계평면시일(Mechanical face seal)의 두가지 형태가 있다.

a. 탄성체 평면시일

그림 6에서 보여주고 있는 것처럼 밀봉정도에 따라 유연성이 우수한 탄성체만을 사용하는 경우와 밀봉기능을 강화시켜 주기 위하여 가터 스프링을 사용한 두가지가 있다.

시일 립 선단부와 접촉하는 면의 가공조도는 0.25~0.50 μm 정도를 요구하고 있고, 평면도는 저속에서 0.13 mm 이하로 유지하도록 해야한다.

b. 기계평면시일

기계평면시일은 회전속도, 온도나 윤활제의 제약조건 때문에 축시일을 사용하기가 곤란한 경우에 사용되고 있으며, 일반적으로 다른 시일에 비하여 복잡하고, 정밀하며 치수가 크다. 시일의 크기나 작동조건에 따라 다르기는 하지만 접촉면의 표면조도는 0.05~0.25 μm, 평면도는 0.4~30 μm을 보통 유지하고 있다. 그림 7은 기계평면시일을 보여주고 있다.

④ 래버린스 시일(Labyrinth seal)

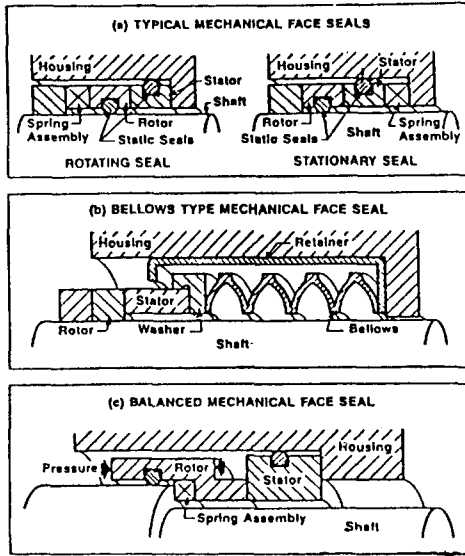


그림 7. 기계평면시일

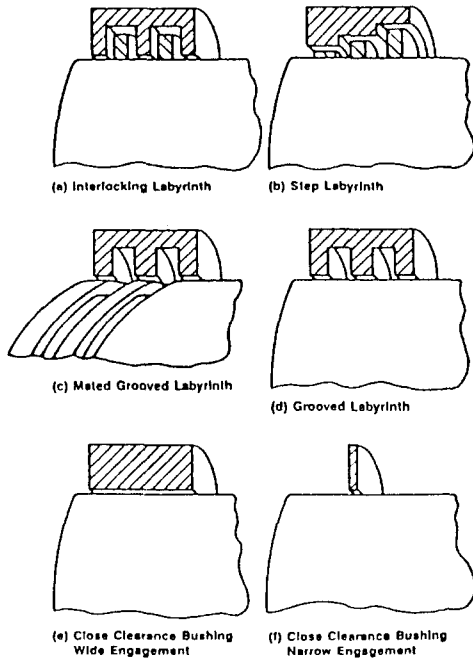


그림 8. 래버린스 시일

비접촉식 시일의 대표적인 형태로 래버린스 시일의 성능은 상대 비접촉 운동면간의 간극과 내외부의 위치 에너지 차이를 감소시키는 기능에 의존한다. 시일의 밀봉기능을 향상시키기 위하여 그림 8에서 보여주는 것과 같이 여러가지 형태의 래버린스 시일이 개발되었다.

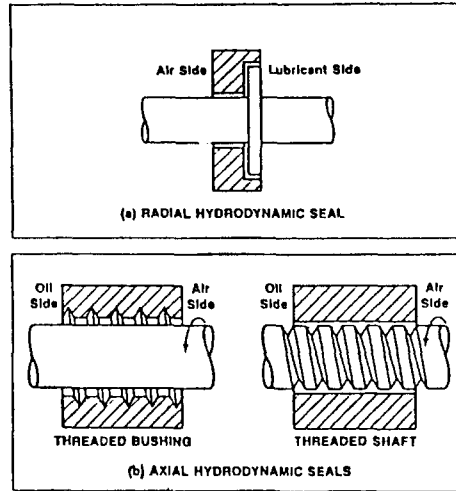


그림 9. 비접촉식 유체 시일

가공된 래버린스 시일의 직경 간극 정도는 회전축의 직경이 50 mm인 경우 0.13 mm이고, 300 mm인 경우 1.3 mm를 설계치수로 주고 있다. 시일의 밀봉성능을 향상시키기 위하여 가공한 홈의 깊이는 최소 1.3 mm는 유지해야 하며, 일반적으로 시일의 폭이 증가될수록 밀봉성능은 향상된다.

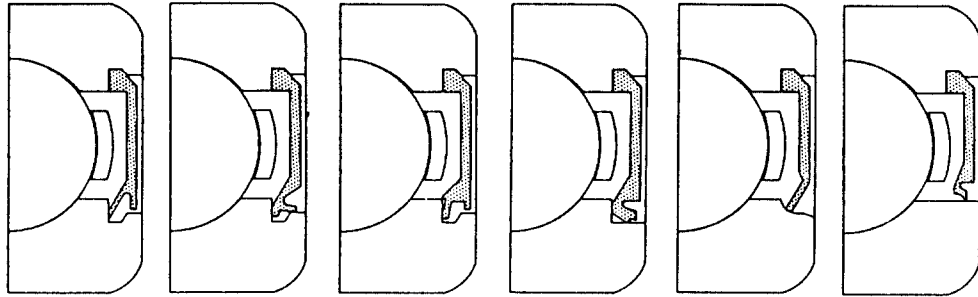
⑤ 유체 시일(Hydrodynamic seal)

래버린스 시일과는 비접촉식인 점이 같고, 구조적으로 시일 내외부의 위치 에너지 차이를 크게 줄일 수 있다는 점이 다르다. 특히 유체시일을 밀봉 유체의 누설을 방지하기 위하여 그림 9와 같은 형태를 취하고 있으므로 외부로부터 이물질이 함유될 우려가 있기 때문에 필요할 경우 더스트 시일을 사용하는 것이 좋다.

2-4. 시일 립의 형상

시일은 시일 립의 접촉 형태에 따라 평면시일(Face seal)과 축시일(Radial seal)로 분류할 수 있다. 평면시일은 시일 립이 내륜의 축방향에 수직인 측면에 그림 1의 (1)과 같이 접촉하는 것을 말하고, 축시일은 시일 립이 그림 1의 (2)와 같이 내륜의 레이스 면 또는 회전축의 외경에 접촉하는 것을 말한다. 또한 베어링에 사용되고 있는 밀봉시일은 시일의 성능이 베어링의 회전 정밀도와 밀접하게 연관되어 있으므로 시일 형태만을 가지고 밀봉 성능을 판단한다는 것은 어렵다.

베어링용 밀봉시일은 베어링 업체에 따라 독특한 형상을 가지고 있는데 그 종류는 평면시일 형태, 축시일 형태 또는 이 두가지를 복합한 형태로 나올 수 있으나 실제로 사용되고 있는 시일로는 대체적으로 평면시일과 축시일 형태가 주종을 이루고 있다. 평면시일 형태의



(1) DD Type (2) LLU Type (3) DDU Type (4) NSL Type (5) RS Type (6) RSR Type

그림 10. 구름 베어링용 고무시일의 형상

대표적인 것은 KMC사의 DD 시일과 SKF사 등에서 널리 사용되는 RS 시일 및 DDU 시일이 있고, 대표적인 축시일 형태는 FAG사의 RSR 시일이 있다.

평면시일은 대부분 내륜에 홈을 가공하고 그 측면에 시일 립을 밀착시키는 형태를 취하므로 공정이 많고 제작 및 관리상 어려움이 있다. 그러나 밀봉성능을 향상시키기 위해 시일 홈을 이용해서 래버린스 형태의 시일 제작이 용이하고 시일 홈 바깥부분, 즉 플링거의 이용이 용이하며 베어링내의 좁은 공간에서 제작하기 용이하기 때문에 많이 채용되고 있다. 축시일은 깊은 홈 볼 베어링에 사용되는 경우 베어링 내륜의 제작이 비교적 간단하며 시일의 형태도 복잡하지 않아 공정상 유리하다. 이 두 가지 형태의 시일에 대한 장·단점을 형태상으로만 비교하면 우선 베어링의 반경방향 틈새에 대해서는 평면시일이 우수한 반면, 축방향 틈새에는 축시일 우수한 점을 가지고 있다.

편심경사도(Misalignment)에 대해서는 두가지 형태 시일의 장·단점을 비교하기 어렵고 복합형태의 시일이 유리한 면을 가지고 있다. 반경방향으로 큰 하중을 받는 곳에서는 평면시일이 형태상 우수하므로 깊은 홈 볼 베어링의 경우 평면시일이 형태적인 면에서 유리하다고 할 수 있다. 왜냐하면 깊은 홈 볼 베어링은 반경방향으로 일정한 하중하에서 작동할 때 부하권과 비부하권의 반경방향 틈새가 발생하고, 평면시일은 이러한 틈새를 쉽게 극복할 수 있는 구조를 갖고 있기 때문이다.

그림 10은 현재 사용되고 있는 여러가지 시일형태를 보여주고 있다. 여기서 (1)의 KMC사의 DD 시일형태, (2)는 일본 NTN사의 LLU 시일형태, (3)은 NSK사의 DDU 시일형태, (4)는 NACHI사의 NSL 시일형태, (5)는 스웨덴 SKF사의 RS 시일형태, (6)은 독일 FAG사의 RSR 시일 형태를 각각 보여주고 있다.

2-5. 시일 립의 윤활

시일의 립 선단부는 내륜과 직접 상대 접촉운동을 하는

부분이고, 시일이 접촉운동을 하는 상대재질에 비하여 경도가 낮은 경우는 시일 립 선단부에서 마멸이 일어나게 된다. 그래서 시일 립의 윤활은 시일 립 선단부의 마멸을 방지하고 마찰력을 감소시키며 밀봉성을 유지하는데 그 목적이 있다.

시일 립과 내륜의 접촉면을 정밀하게 가공하여 조립한다 하여도 시일 립과 접촉면 사이에는 틈새가 존재하기 때문에 완전한 밀봉을 기대하기는 어렵다. 이를 해결하기 위하여 시일 립과 접촉면 사이에 윤활제를 공급하여 유막을 형성시킴으로써 마멸방지는 물론 밀봉성을 유지할 수가 있다.

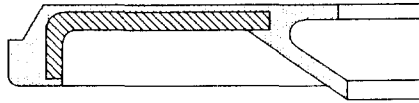
시일 립과 회전 접촉면 사이에 윤활제를 공급하는 방법으로 시일 립 설계시 윤활제가 시일 립 부위에 잘 공급되도록 하여야 한다. 베어링에서 윤활제의 유동방향을 보면 대부분이 그림 1에서 보여주고 있는 것과 같이 베어링의 중심부에서 외측으로 이동 순환함으로써 시일의 내부 및 립 선단부의 마찰부위를 윤활하게 된다. 이때 윤활제로 사용되고 있는 그리이스 자체의 유동성은 나쁘나 베어링 내부의 마찰에 의하여 발생하는 열이 그리이스의 유동성을 양호하게 해준다.

베어링용 시일은 대부분 자동으로 조립·생산되고 있으므로 시일 립의 접촉부위를 윤활제로 일부러 도포한다는 것은 관리상 문제가 있으며 경우에 따라서는 도포가 어려운 형태가 있으므로 베어링 작동중에 윤활제의 자연스런 유동에 의하여 시일 립에 윤활되는 것이 가장 효과적이다.

그림 1의 (1)에서 보여주는 것과 같이 베어링 내부에서 시일 립(A 부분)을 경유하여 외부로 윤활제의 이동, 즉 누설이 일어나게 되면 시일 립 선단부에 윤활이 되면서 윤활유막이 형성되므로 시일 립에서의 마찰 토오크 및 마찰열이 완화되게 된다.

2-6. 시일의 성능 조건

구름 베어링용 시일 성능은 일반적으로 베어링의 요



(A)Head (B)Body (C)Lip

그림 11. 구름 베어링용 시일의 명칭

구조건에 따라 결정된다. 베어링의 형태, 사용조건, 밀봉 유효제의 종류, 시일장착 부위의 설계, 베어링이 설치된 주변환경 등에 따라 차이가 있기는 하지만 일반적인 특성은 다음과 같다. 이 특성은 다른 시일 형태에도 같이 적용이 되지만 특히 기술적인 고려사항이 많은 접촉형 고무시일을 중심으로 발췌한 것이다.

- ① 유효제 누설 방지능력
- ② 방진, 방수성
- ③ 치수안정성 및 치수정밀도
- ④ 내마멸성
- ⑤ 내열, 내한성
- ⑥ 내유성 및 용제에 대한 저항성
- ⑦ 경제성

상기의 요구조건은 시일의 주기능인 밀봉성을 만족시키기 위해서 필요한 조건이다. 이와 같은 성능조건을 만족시키기 위해서는 시일 재료의 선택, 설계, 제작 등에서의 주의와 노력이 필요하고, 특히 시일의 작동조건에 관련된 접촉압력의 크기는 시일의 밀봉성능과 마멸조건에 대단히 중요한 영향을 준다.

베어링용 밀봉시일의 설계는 접촉형인 경우 시일 립과 접촉되어 밀봉되는 상대면에 밀착성을 부여하여 밀봉이 되도록 설계한 것이며, 이 때의 접촉압력은 재료의 탄성에 의존하게 된다. 오일시일의 접촉압력(또는 긴박력)은 스프링과 같은 탄성체의 탄성력에 크게 의존하지만, 베어링(특히 밀봉형 구름 베어링)은 콤팩트한 형상 때문에 시일의 크기가 제한을 받게 되므로 고무 이외에 다른 탄성체를 사용하기 어려운 설계상의 제한이 따른다.

베어링용 시일중 접촉형 고무시일의 각 부분의 명칭은 그림 11에서 나타낸다. (A)는 시일의 머리부분으로 베어링 외륜의 외측에 가공된 시일 홈에 삽입되어, 고무의 탄성에 의하여 시일을 베어링 외륜과 고정하게 된다. 시일 홈과는 일정한 간섭량을 갖게 함으로써 베어링의 회전중에 시일이 베어링 외륜과의 마찰에 의하여 상대운동을 하지 못하도록 한다. 작동중에 베어링의 내압이 갑작스럽게 상승하는 곳에서는 머리부분을 특별하게 설계하여 시일의 탈착방지를 도모하는 경우도 있다. (B)는 시일의 몸통부분으로 외부의 힘에 의하여 시일이 변형되는 것을 방지하며, 베어링이 작동되는 동안에 시일의

형태를 유지시켜 설계된 상태로 시일 형상이 유지되도록 하는 부분이다. 이 부분은 시일의 머리부분과 시일의 립부분을 연결시키는 곳으로 강성이 낮은 고무재료로는 시일의 강도를 적절하게 유지시키기가 어렵기 때문에 보통 철판으로 된 보강태가 삽입되어 있다. (C)는 시일에 있어서 가장 중요한 시일 립으로 베어링 회전시 내륜과 상대운동을 하면서 실제적인 밀봉을 하는 핵심 부분이다. 시일의 내열성, 내마멸성, 내유성, 방진성, 방수성 등 밀봉성과 관련되는 대부분의 성능은 시일 립과 직접적인 관계가 있다.

밀봉에 영향을 주는 일반적인 요소는 시일의 치수, 접촉면적, 유효제, 작동조건 등이 있다. 시일 뿐만 아니라 주변부, 작동조건 등 고려하여야 할 요소가 많은데 이 역시 시일 립에 관한 사항이 대부분으로 시일 립의 설계가 곧 시일의 설계라 할 정도로 시일 립의 중요성은 절대적이다.

시일에서 가장 중요한 요소인 시일 립이 가져야 할 기능을 접촉형 고무시일을 예로 간단하게 요약하면 다음과 같다.

- ① 시일 립은 사용 유효제에 대한 내성과 내열, 내마멸성이 있어야 한다.
- ② 시일 립은 누설을 방지하기에 충분한 접촉압력과 누설이 일어나기 어려운 구조를 가져야 한다.
- ③ 적용에 있어 회전 정밀도를 만족하기 위한 시일 립과 접촉면 사이에 적절한 간섭량을 가져야 한다.
- ④ 마찰열 발생을 최소화시키기 위하여 충분히 두꺼운 유막을 형성할 수 있어야 한다.
- ⑤ 시일 립의 두께와 길이는 허용범위가 작아야 한다.

2-7. 시일의 재질

2-7-1. 시일 재질의 특성

베어링에 사용하는 시일의 재료에는 고무시일에 사용하는 고무, 실드형에 사용하는 강판, 나일론 등의 플라스틱과 같이 다양하다. 실드형은 시일 재질이 회전 운동부에 직접 접촉하지 않으므로 밀봉성능에 미치는 영향이 작아 그다지 문제가 되지 않는다. 반면에 고무(특히 접촉형 고무시일의 경우)는 재질이 운동부에 직접 접촉하기 때문에 밀봉성과 베어링의 적용온도와도 깊게 관련되어 있으므로 접촉형 고무시일에 사용하는 고무재료는 다음과 같은 특성을 요구하고 있다.

- ① 내열 및 내한성
- ② 내유성 및 용제에 대한 저항성
- ③ 치수안정성 및 치수정밀도
- ④ 적절한 탄성
- ⑤ 내마멸성
- ⑥ 경제성

베어링에 사용되는 고무시일의 재료는 베어링 윤활의 매체인 그리이스와 직접 접촉을 하고 있으므로 그리이스의 기유에 대한 내유성이 특히 요구된다. 밀봉형 베어링에 사용되는 그리이스는 일반 윤활유와 마찬가지로 광유를 기유로 채용하고 있는 경우도 있으나 그리이스의 특성을 향상시키기 위하여 합성유를 기유로 사용하고 있는 경우도 많이 있기 때문에 고무재료 선택시 이런 점이 고려되어야 한다. 또한 베어링 제작이나 기계 시스템 보수시 사용되고 있는 탈지유, 용제 등에 대한 저항성이 있는 재료의 선택이 요망되고 있다.

접촉형 고무시일에서는 접촉부가 계속 마찰회전되고 있으므로 내마멸성이 요구되며 경년(Aging)에 대해 재질의 변화가 작아야 한다. 구름 베어링용 고무시일의 경우 밀봉 성능은 고무자체의 탄성에 크게 의존하고 있기 때문에 고무재료의 적절한 탄성과 치수정밀도 및 치수안정성이 요구된다.

고무는 유연성, 내부식성, 탄성 등이 우수하며, 가공된 접촉 운동면에 대한 적합성이 좋으므로 누설을 방지할 수 있는 장점이 있다. 그러나 사용온도, 내유성, 내마멸성, 마찰력에서 불리한 점은 있으나 구름 베어링용 시일 재질로써의 고무는 장점이 많으므로 널리 사용되고 있다.

시일 재질로 널리 사용되고 있는 니트릴 고무(NBR), 아크릴 고무(ACM), 실리콘 고무(VMQ), 불소 고무(FKM)의 상대적인 코스트를 비교하면, 니트릴 고무를 1로 볼 때 아크릴 고무는 2, 실리콘 고무는 5, 불소 고무는 10에서 20을 나타낸다.

2-7-2. 고무 재료의 종류

(가) 니트릴 고무(NBR)

니트릴 고무는 시일에서 가장 많이 사용되고 있는 일반적인 고무재료로 비교적 값이 저렴하고, 내마멸성이 좋으며, 특히 내유성이 좋다. 내유성과 저온 능력은 AN(Acrylo-Nitrile)의 함량과 직접적인 관련이 있으며, 이것들의 혼합비율 조절은 대단히 중요하다. AN이 증가하면 내유성은 좋아지나 저온성은 떨어진다.

가솔린이나 Automatic Fluid(Low molecular automatic)이나 Polar Aliphatic 등과 같은 유체에 니트릴 고무의 사용은 부적합하다. 니트릴 고무는 $-40\sim 110^{\circ}\text{C}$ 까지 사용이 가능하나 고온의 극압 첨가제가 있는 오일에는 부적합하므로 주의를 요한다. 극압 첨가제 중에서 Chlorinated Paraffin이나 Sulphonated Olefin과 같은 극압첨가제는 니트릴 고무의 표면을 경화시켜 고무 전체를 이상 경화시키거나 균열을 일으킨다. 베어링용 시일 재질은 베어링 하우징에서의 온도보다 시일 립에서의 온도가 약 $20\sim 30^{\circ}\text{C}$ 이상 높다는 사실을 유의하여 재질을 선정해야 한다.

Carboxylated Nitrile 고무의 내유성은 일반 니트릴과

같지만 보다 고온에서는 내마멸성을 가지며 저온에서는 취약한 특성을 갖는다.

(나) 아크릴 고무(ACM)

아크릴 고무는 폴리 아크릴 고분자로 제조된 고무로 니트릴 고무 다음으로 경제적인 재질이다. 이 고무는 니트릴 고무보다는 높은 150°C 정도의 온도에서 엔진 오일이나 트랜스 미션 오일에서 사용이 가능하고 특히, 극압 첨가제가 첨가된 오일과 접촉하는 분위기에서도 사용할 수 있다. 그러나 Polyacrylate는 Ester의 일종이므로 물, 산, 염기, 극성용매(예: 케톤)에는 매우 약하다.

초기에 아크릴 고무는 내마멸성과 저온성이 좋지 않았기 때문에 사용 범위가 극히 제한적이었으나 10여년 전부터 -40°C 에서도 사용이 가능한 재질이 개발되었다. 이 재질은 열이나 내유성에는 약간 나쁘지만 $-40\sim 150^{\circ}\text{C}$ 까지 사용할 수 있다. 아크릴 고무의 내마멸성은 시간이 지남에 따라 많이 개선은 되었으나 아직도 니트릴 고무에 비하여 많이 뒤떨어지고 있다.

(다) 실리콘 고무(VMQ)

실리콘 고무는 사용온도 범위가 $-90\sim 200^{\circ}\text{C}$ 로 시일 재질중에서 가장 넓다. 실리콘 고무는 자동차의 엔진 오일, 기어 오일, 합성 브레이크 오일, Di-ester 등 석유계 윤활제 및 물, 산과 염기에서 우수한 성능을 갖고 있으나 Chlorinated Automatic Solvent, 가솔린 등에는 사용하기가 어렵다. 또한 실리콘 고무는 Lead Naphthenate와 Zinc Dithiocarbonate 등의 극압 첨가제에 접하게 되면 기능이 떨어지고, 산화된 윤활제 역시 고무에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 실리콘 고무는 일반 작동 조건에서는 내마멸성이 우수하지만 건조 윤활 조건에서는 대단히 좋지 않다. 그래서 실리콘 시일은 사용하기 전에 오일 중에서 유지시킨 후 사용하면 초기의 건조마찰 작동 기간 중에 발생될 수 있는 마찰현상을 막을 수 있다. 실리콘 고무는 인장 강도가 작기 때문에 찢어지기 쉬우므로 초기 삽입이나 이동 보관 중 손상이 없도록 주의를 요한다.

(라) 불소 고무(FKM)

불소 고무는 화학적으로 다른 4불화 탄소(Fluorocarbon)와 4불화 실리콘(Fluorosilicon)의 2가지가 있다. 이 중에서 4불화 탄소가 보다 광범위하게 사용되며, 4불화 실리콘은 근래에 약간 적용되고 있다. 불소고무 재료는 230°C 정도의 고온에서도 사용이 가능하나 대단히 비싸기 때문에 아주 제한된 용도에만 사용한다.

4불화 탄소는 내화학성 및 내열성이 뛰어나며 재질의 강도가 우수하기 때문에 고밀봉을 요하는 시일의 재질에 적합하다. 그러나 이 재질은 저온에서 경하다는 단점을 가지고 있다. 비록 -40°C 까지 취성은 없으나 -25°C 정도에서 립의 탄성회복이 일어나지 않기 때문에 -25°C 이하에서 시일로 사용하기는 어렵다.

4불화 실리콘은 4불화 탄소와 같이 화학적인 내성과 내열성을 가지고 있으며 실리콘 본래의 특성인 저온 성능도 매우 우수하다. 그러나 잘 찢어지는 성질이 있으며 4불화 탄소에 비해 내마멸성이 떨어진다.

2-7-3. 시일 재질의 선정기준

시일재료는 내열성, 열전도성, 마찰계수, 마멸거동, 내유성, 상호작용성, Wetability, 동적강도, 탄성 등을 고려하여 선정해야 한다. 특히, 고무시일의 밀봉성능에 관련이 있는 탄성, 간섭량, 접촉압력, 접촉면적 등의 변화를 작동조건에 연계하여 시일재료의 성질을 표현하면 다음과 같다.

① 고무재질은 온도나 접촉압력이 증가함에 따라 탄성은 변한다.

② 열팽창은 접촉압력, 접촉면적 및 간섭량에 영향을 준다.

③ 밀봉유체에 의한 팽윤은 접촉압력과 간섭량을 변화시킨다.

④ 고무재료의 경화 또는 연화현상은 접촉압력, 접촉면적 및 간섭량을 변화시킨다.

⑤ 마멸은 하중, 간섭량, 접촉면적을 변화시킨다.

(가) 열특성

작동온도에 적절한 시일재질을 선정하기 위해서는 사용온도 범위를 고려하여야 한다. 시일재질의 저온특성은 취성온도에 의하여 영향을 받으며, 이 온도 이하에서는 시일재질이 균열되거나 파괴가 일어난다. 취성온도는 회전속도가 높아지거나 회전 정밀도가 나빠질수록 높아진다. 시일재질의 고온특성은 고무재질마다 고온의 사용온도 한계로 요약되는데 이것은 고무재료의 물성치가 저하되는 온도이다.

(나) 탄성

시일의 고무재질이 매우 큰 탄성을 가지게 되면 접촉압력이 유막을 손상시키면서 시일 립 선단부에 과도한 마멸을 유발하게 된다. 또한 탄성계수가 너무 크면 시일과 내륜사이의 편심에 의하여 일어날 수 있는 벗어나는 현상(Run-out) 때문에 변형된 시일 립이 복원할 수 없게

된다. 즉 시일의 탄성 변형성이 작아짐에 따라서 변형된 시일이 복원되지 못하므로 윤활제의 누설이 일어나게 된다. 극단적인 경우 탄성계수가 비정상적으로 커지면 시일 립의 파괴가 일어날 수도 있다.

고무재질은 일반적으로 온도가 높아짐에 따라 탄성계수가 감소한다. 그 결과 시일 립의 접촉압력은 점점 작아지게 된다. 또한, 이와 동시에 일어날 수 있는 반대 현상은 온도가 상승함에 따라서 고무에 가황을 진행시켜 고무를 경화시키게 되면 오히려 탄성계수가 높아질 수도 있다. 그러므로 사용 고무의 가황정도 및 사용온도에 대한 고려는 유기적인 관계를 가지고 검토하여야 한다. 즉, 어떤 온도에서 탄성계수의 변화가 고분자 물질의 열적이완에 의한 것인지, 고무의 과가황(Over-curing)에 의한 것인지, 또는 이 두가지의 복합작용에 의한 것인지를 구분하여 관찰할 필요가 있다.

(다) 내유성

오일중에 함유된 첨가제에 의하여 시일재료는 큰 영향을 받고 있으므로 시일재료를 선정하기 위해서는 반드시 내유성, 즉 밀봉유체에 대한 저항성을 시험해야 한다.

참 고 문 헌

1. 川上善久, June 1983, "高密封性能玉軸受と その用途," Vol.27, No.7, pp.73-77.
2. Benktander, S.A., 1981, "Automotive Hub Bearing Units-European Experience," SAE Paper 810757.
3. Bras, J.C.M., 1987, "Specification and Seal Development for Passenger Vehicle Wheel Bearings," SAE Paper 871982.
4. 일본윤활학회, "윤활핸드북," 養賢堂, 1987.
5. Schmitt, W.A., April 1968, "Radial Load as a Lip Seal Design and Quality Control Factor," J. of Lub. Tech., pp.405-411.
6. Stakenborg, M.J.L., 1988, "On the Sealing Mechanism of Radial Lip Seals," Tribology International, pp.335-340.